

多孔質体中の水分挙動の重力依存性

メタデータ	言語: ja 出版者: 公開日: 2019-07-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 佐藤, 直人 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/20279

明治大学大学院農学研究科

2018年度

博士学位請求論文

(要約)

多孔質体中の水分挙動の重力依存性

(Gravity Dependence of Liquid Flow in Porous Media)

学位請求者 農学専攻

佐藤 直人

第1章 はじめに

近年、地球外の天体において水が存在する証拠の発見が相次いでいる。Li et al. (2018)は近赤外光の反射スペクトル解析を行い、月極域のクレーターの永久影で地下数 mm の深さに水の氷が存在することを明らかにした。また、ESA の火星探査衛星 Mars Express は、2012 年に火星南極域において地中レーダー探査を行い、地表付近に存在する氷の下に安定した液状水が存在することを発見した (Orosei et al., 2018)。このように、月や火星表層の水は失われてしまった一方で、地下には現在も水が存在している (Karlsson et al., 2015)。月や火星の低気圧・低湿度環境では、水は昇華してしまい、長期間存在することは難しいと考えられており (Haberle et al., 2001; Li et al., 2018)、地下の浅いところになぜ氷が存在するのか明らかではない (猿谷, 2016)。このような月や火星の水資源は、将来の有人探査の現場資源としての利用が期待されており (Li et al., 2018)、多孔質体中の水分挙動についてより詳細に明らかにする必要がある。

将来の有人探査における現場水資源の利用先として、「宇宙農業」が挙げられる。「宇宙農業」とは、長期多人数型ミッションにおいて生じる食料問題を現地で作物の自給自足を行うことで解決する生命維持システムの 1 つである。たとえば 3 年間のミッションでは食料だけでも宇宙飛行士 1 人あたり 15 トン必要で (北宅ら, 2016)、そのコストは地球の低空周回軌道でも \$10,000/kg、火星では \$300,000/kg (Massa et al., 2007) と見積もられており、地球からの補給に依存することは現実的ではない (Maggi et al., 2018)。そこで宇宙空間における作物栽培システムの検討が行われている (Bingham et al., 2000; Massa et al., 2017)。しかし、多孔質体培地を用いた栽培システムでは、作物根圏の水分量制御の困難さが報告されている。宇宙ステーション Mir の小麦栽培実験では、多孔質体中の含水量をモニタリングし、乾燥してきたところで注水を行う自動給水システムが採用された (Bingham et al., 2000)。しかし、植物が吸水を始めると多孔質体の水分量が急激に減少し、注水量を上げて多孔質体中の含水量を上げることができなかった。水源の水位の減少量から予想される多孔質体の含水量と実際の含水量が大きく異なり、多孔質体に水が浸み込みにくくなったことが明らかになった。国際宇宙ステーション (ISS) で行われた VEGGIE プロジェクトでは、ロメインレタスの栽培が行われた (Massa et al., 2017)。多孔質体は水源から吸水できるように設計されていたが、5 つのサンプルのうち 3 つのサンプルが低水分状態となった。宇宙飛行士による強制灌水により 1 つのサンプルで低水分状態から回復したが、2 つのサンプルのレタスは回復しなかった。このように微小重力 (μG) 下では多孔質体中の水分挙動が予想と大きく異なったことから、従来の水分移動理論が適用できない可能性がある (Bingham et al., 2000)。そこで本研究では、重力の変化が多孔質体中の水分移動に与える影響を明らかにすることを目的として、多孔質体中の巨視的および微視的な水分移動について検討を行なった。

第2章 微小重力下における従来の水分移動理論の適用性の検討

不飽和多孔質体中の水分移動はマトリックポテンシャル勾配および重力勾配を駆動力とし

て式[1]のように表される (Richards, 1931).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right) \quad [1]$$

ここで θ は体積含水率, t は時間, z は距離, K は透水係数, $\frac{\partial \psi}{\partial z}$ および $\frac{\partial \phi}{\partial z}$ はマトリックポテンシャル勾配および重力勾配である. 特に水平浸潤のみを考えるとときには重力勾配を無視できるため, 水分移動はマトリックポテンシャル勾配のみを駆動力として式[2]のように表される.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad [2]$$

多孔質体中の水平浸潤と同様に, μG 下においても多孔質体中の重力勾配は無視できると考えられ, 水分移動は式[2]によって表されることが考えられる. したがって, 水平浸潤は μG 下における水分移動を適切に模擬できると考えられた (Jones and Or, 1999). ところが, Yendler ら (1996) が粒径 1.5 mm のガラスビーズを用いて μG 下で測定した浸潤速度を 1G 下における水平浸潤速度と比較したところ, μG 下の浸潤速度が水平浸潤速度と比較して小さくなることが明らかになった. μG 下では多孔質体中の浸潤が予想と大きく異なったことから, 従来の水分移動理論の適用性が疑問視されている (Jones and Or, 1999). そこで本研究では, 1G 下における水平浸潤と μG 下における多孔質体中の浸潤を比較することで, 従来の水分移動理論の適用性について検討を行った. まず, 0.4 mm のガラスビーズを用いて μG 下における浸潤を観察した. μG 環境は航空機を放物線飛行させるパラボリックフライトによって獲得した. 1回のパラボリックフライトの μG 継続時間は $18 \text{ 秒} \sim 20 \text{ 秒}$ 程度であるので, 連続した3回のパラボリックフライトを実施して μG 環境を作出し実験を行った. μG 下における浸潤と比較するために 1G 下の水平浸潤実験に比べて, μG 下の浸潤実験では浸潤速度の低下が観察されたが, その低下量は 1.5 mm のガラスビーズを用いた Yendler ら (1996) の実験の低下量よりも小さかった. このような浸潤速度の低下は粘性の大きな浸潤溶液を使用した実験においても報告されており, 間隙径が小さい多孔質体や高い粘性によりゆっくりとした浸潤が起こる条件では重力の低下による浸潤速度の低下量が小さくなる可能性が示唆された. また, 既往の研究から気相の捕捉 (乾燥ポケット) が, 浸潤速度の低下の原因である可能性が指摘されているので, 乾燥ポケットがほとんど発生していないと考えられる浸潤初期における多孔質体中の水分移動を観察した. 落下塔による約 2.8 秒 の μG 環境下において 1 mm および 2 mm ガラスビーズ多孔質体中の鉛直上方浸潤を観察した. 1 mm のガラスビーズを用いた実験では実測値と理論値が一致し, 極めて初期の浸潤には現在の水分移動理論が適用可能であることが明らかになった. また, 粗い粒径 (2 mm) では, 部分的に“ジャンプ”と呼ばれる瞬間的な水分移動が観察された. このような微視的な水分挙動が浸潤速度に大きな影響を与えたことから, μG 下における水分移動を明らかにするには単一間隙内の水分挙動についても検討する必要があることが判明した.

第3章 間隙内の水分挙動

μG 下において浸潤速度が低下した原因として, 多孔質体中の飽和度が低下した可能性が指

摘されている。間隙の中には浸潤を阻害する形状が存在することが報告されており（丸尾ら, 2016), 間隙形状と水分挙動の関係を明らかにする必要がある。そこで本研究では, 単一間隙中の水分移動を観察し, 微視的な水分挙動の関係を明らかにした。通直な毛管に働く毛管力の理論を, 実際の多孔質体中に存在するような逆円錐型の毛管に働く毛管力を表す理論に拡張した。また, 接触角の影響を明らかにするため, 親水性および撥水性のガラスビーズで作成した 2 次元多孔質体中の水分移動をビデオカメラで観察し, COMSOL Multiphysics を使ったシミュレーションの結果と比較した。加えて, 間隙形状の影響を明らかにするため, 粒子間距離の異なる単一間隙中の水分挙動について COMSOL Multiphysics によるシミュレーションを行った。シミュレーションの結果, 大きい接触角(撥水性)や粒子間距離の増加によって単一間隙中で水分移動が停止し, 浸潤が阻害された。このことから, 単一間隙中で水分移動が停止するかどうかは接触角と粒子間距離で決定されることが明らかになった。しかし, 小さな液滴界面では重力変化による接触角の変化は小さいと考えられており（長沼ら, 2017), 月や火星のレゴリスや宇宙農業での使用が想定される多孔質体では接触角の影響は小さいと考えられる。一方, 1G 下では重力によって粒子が下方向に押し付けられ, 粒子が密に配列するのに対して, μG 下では粒子の配列が変化し, 粒子同士の距離が大きくなることが報告されており（Reddi et al., 2005), このような粒子配列の変化は間隙径分布や水の連続性に影響を与える可能性がある。したがって, 従来の低重力下における実験では, 粒子同士の距離が大きくなることで浸潤を阻害する間隙が増加し水分移動が低下した可能性がある。

第 4 章 浸潤溶液の物理性が多孔質体中の水分移動に与える影響

密度・粘性・表面張力といった浸潤溶液の物理性はマトリックポテンシャルや透水係数を支配するパラメータであるが, 特に粘性について野川ら(2018)は重力と負の相関があると報告しており, μG 下における浸潤溶液の物理性の変化が水分移動を変化させた可能性がある。しかし, 多孔質体中の浸潤に対して, どの因子がいつ, どれくらいの大きさで働くのかは明らかではない（Beatty and Smith, 2014). 浸潤溶液の物理性の相対的な影響力の大きさは, 水と異なる物理性を持つ浸潤溶液の, 水に対する相対的な移動しやすさ（相対的移動度: **relative mobility**) として評価される。本研究では可変重力下においても適用可能な相対的移動度を表す指標を提案するため, 次元解析による水平浸潤理論の推定を行った。多孔質体中の水平浸潤について, 浸潤距離 l [L]に 関係し そうな物理量として経過時間 t [T], 代表間隙径 r [L], 浸潤溶液の表面張力 σ [MT⁻²]および粘性 η [ML⁻¹T⁻¹]が挙げられ, これらの物理量の間にある関係は次元解析により式[3]のように推定された。

$$\frac{l}{r} = \beta \left(\frac{\sigma t}{r \eta} \right)^a \quad [3]$$

ここで a および β は無次元定数である。右辺の $(\sigma t / r \eta)$ は粘性と表面張力の比によって表される無次元パラメータであり, 水平浸潤における粘性と表面張力の相対的な重要性を定量している。ここで水の $(\sigma t / r \eta)$ に対するある浸潤溶液の $(\sigma t / r \eta)$ の比を S-N number と定義した。

$$S-N \text{ number} = \frac{\frac{\sigma_i \cdot t_i}{r_i \cdot \eta_i}}{\frac{\sigma_w \cdot t_w}{r_w \cdot \eta_w}} \quad [4]$$

ここで添字の i は浸潤溶液を示し、 w は水を示す。多孔質体の物理的構造が同じ、すなわち代表間隙径が同じであるとき、ある時間 t における $S-N$ number は次のように単純化できる。

$$S-N \text{ number} = \frac{\frac{\sigma_i}{\eta_i}}{\frac{\sigma_w}{\eta_w}} \quad [5]$$

$S-N$ number は表面張力および粘性が浸潤速度に与える相対的な影響力の大きさを定量するパラメータであり、水平浸潤において水に対するある浸潤溶液の相対的移動度を示す指標として用いることができると考えられる。このことを確かめるため、浸潤溶液として様々な濃度のエタノール水溶液を用いて水平浸潤実験を行い、 $S-N$ number の適用可能性を検討した。エタノール濃度 0 vol% から 30 vol% では濃度の増加とともに浸潤速度は低下したが、70 vol% から 100 vol% では濃度の増加とともに浸潤速度は増加した。このような表面張力および粘性の変化による水平浸潤速度の変化は $S-N$ number と強い相関があった。従来用いられてきたパラメータ「 fm 数」は重力の存在を前提としており、 μG 下では新たに提案した $S-N$ number による評価が望ましいと考えられた。

第5章 擬似微小重力実験の適用性の評価

宇宙における作物栽培システムの構築を目的とした多孔質体中の水分挙動に関する研究は 1990 年代に開始され 20 年以上行われてきた。それにもかかわらず現在まで多孔質体中の水分挙動が明らかでないのは、 μG 下で土壌物理実験を行うことの困難さが原因である。宇宙実験の複雑さとコスト高は、議論の範囲と一般性を制限し (Chau et al., 2005)、実験回数の少なさのため統計的な信頼性を確保できない要因となっている (Yendler et al., 1996)。多孔質体中の水分挙動をより信頼性高く、より厳密に計測するためには、より長い期間の μG 実験が必要である (Or et al., 2009)。そこで本研究では植物実験や微生物実験で用いられている 3D クリノスタットを用いて土壌物理実験を行い、 μG 下の現象の再現可能性について検討した。3D クリノスタットは、サンプルを無作為に回転させることにより、あらゆる方向の重力による刺激を排除する装置であり、地球上で μG を模擬する手段として考案された。クリノスタットはパラボリックフライト実験や観測ロケット実験を行うよりも低価格で利用可能であり、また長時間の実験が可能となる (Nakamura et al., 1999)。ただし、3D クリノスタットにより μG を模擬可能かどうかは、回転周波数、実験試料の重力感受性、質量、密度、試料を取り囲む媒体の粘度や密度等に依存する (Hoson et al., 1997) と考えられており、実験を行う対象毎に判断する必要がある。本研究では粒度の異なる 3 種類の多孔質体 (豊浦砂、ガラスビーズ (0.05 mm)、関東ローム) を用いて浸潤実験を行なった。ガラスビーズと関東ロームのように透水性が小さく、速度の遅い流れが生じる多孔質体では重力浸潤を相殺できた。しかし、その浸潤速度は水平浸潤実験と一致し、 μG 下における浸潤速度の低下を模擬できなかった。多孔質体中の水分

移動は複雑で、流路は分岐と集合を繰り返しながら、縦・横・斜めに繋がっている。水平浸潤実験やクリノスタットによる擬似 μG 下では、常にいずれかの流路に沿って重力が働いている状態であり、その流路に沿った微小な流れを排除できなかった可能性がある。また、 μG 下では、粘性や接触角といった浸潤溶液の特性が変化する可能性があるが、 1G 下で行った今回の実験系では浸潤溶液の特性の変化までは模擬できないことが明らかとなった。重力浸潤をほぼ完全に排除できるクリノスタットを使って μG 下における真の浸潤を模擬するためには、 μG 下における溶液特性に近い特性を持つ浸潤溶液を用いるなどの検討が必要である。

第6章 総括

本論文では、重力の変化が多孔質体中の水分移動に与える影響を明らかにすることを主目的として、多孔質体中の巨視的および微視的な水分移動を観察した。第2章では、 1G 下と μG 下における多孔質体中の水分移動を比較することで、現在の水分移動理論の適用性について検討を行った。 μG 下において 0.4 mm のガラスビーズを用いた実験では浸潤速度の低下が観察されたが、その低下量は 1.5 mm のガラスビーズを用いた先行研究の低下量よりも小さかった。間隙径が小さい多孔質体中のゆっくりとした浸潤では μG による浸潤速度の低下量が小さくなる可能性が示唆された。また、気相の捕捉がほとんど発生していないと考えられる浸潤初期においては現在の水分移動理論が適用可能であることを明らかにし、浸潤速度の低下量が時間の関数である可能性を示した。第3章では、単一間隙中の水分移動を観察し、微視的な水分挙動に対する重力の効果を明らかにした。単一間隙中で水分移動が停止するかどうかは接触角と次の粒子までの距離で決定され、粒子配列の変化により浸潤を阻害する間隙が増加することが明らかになった。第4章では表面張力と粘性の変化が浸潤に与える影響を複合的に評価するため、それらの相対的な影響力の大きさを定量するパラメータ「S-N number」を提案し適用性を検討した。表面張力および粘性の変化による水平浸潤速度の変化は S-N number と強い相関があり、重力の存在を前提としている従来のパラメータに比べて、 μG 下では S-N number を用いることが望ましいと考えられた。第5章では3Dクリノスタットを用いて水分浸潤実験を行い、 μG 下における浸潤の再現可能性について検討した。透水性が小さく、速度の遅い流れでは重力浸潤を相殺できたが、その浸潤速度は水平浸潤実験と一致し、 μG 下における浸潤速度の低下を模擬できなかった。

本研究により、粒子間距離の増加といった間隙形状の微視的な変化は、浸潤阻害間隙の発生を促進することが明らかになった。このような幾何学的な変化により間隙水が不連続になると、時間の経過とともに多孔質体の巨視的な飽和度が低下し透水係数が低下すると考えられる。また、幾何学的な変化だけではなく、浸潤溶液の物理性の変化によっても浸潤速度が低下する可能性があることを明らかにした。現在、リチャーズ式の重力依存パラメータは重力項のみであり、他の項に重力は含まれていない。 μG 下における水分移動を推定するためには飽和度の低下や浸潤溶液の物理性の変化を考えに含めたリチャーズ式の見直しが必要である。

引用文献

- 北宅善昭, 平井宏昭, 矢野幸子. 2016. 長期有人宇宙ミッションでの生命維持に必須の食料生産, 物質循環, 健康維持機能を担う植物栽培システムの構築. 第30回宇宙環境利用シンポジウム. 神奈川県.
- 猿谷友孝. 2016. 火星における不凍水とその役割. 地学雑誌, 125(1): pp. 49-62.
- 長沼菜摘, 佐藤直人, 丸尾裕一, 野川健人, 登尾浩助. 2017. 重力の変化が接触角に与える影響. 2017年度土壤物理学大会講演要旨集, pp. 22-23.
- 野川健人, 佐藤直人, 長沼菜摘, 丸尾裕一, 登尾浩助. (2018): 重力の変化と粘性の関係. 2018年度土壤物理学大会講演要旨集, pp. 94-95.
- 丸尾裕一, 佐藤直人, 登尾浩助. 2016. 微小重力下における様々な形状のガラス管内の水の挙動. 2016土壤水分ワークショップ論文集. pp. 4-7.
- Beatty S.M. and J.E. Smith. 2014. Infiltration of water and ethanol solutions in water repellent post wildfire soils. *J. Hydrol.* 514: pp. 233-248.
- Bingham, G. E., S. B. Jones, D. Or, I. G. Podolski, M. A. Levinskikh, V. N. Sytchov, T. Ivanova, P. Kostov, S. Sapunova, I. Dandolov, D. B. Bubenheim, and G. Jahns. 2000. Microgravity effects on water supply and substrate properties in porous matrix root support systems. *Acta Astronautica*, 47(11): pp.839-848.
- Chau J.F., D. Or, and M.C. Sukop. 2005. Simulation of gaseous diffusion in partially saturated porous media under variable gravity with lattice Boltzmann methods. *Water Resour. Res.* 41(8).
- Haberle, R. M., C. P. McKay, J. Schaeffer, N. A. Cabrol, E. A. Grin, A. P. Zent, and R. Quinn. 2001. On the possibility of liquid water on present - day Mars. *Journal of Geophysical Research. Planets.* 106(E10): pp. 23317-23326.
- Hoson T, Kamisaka S, Masuda Y, Yamashita M and Buchen B. (1997): Evaluation of the three-dimensional clinostat as a simulator of weightlessness. *Planta*, 203: S187-S197. 1997.
- Jones, S. B. and D. Or. 1999. Microgravity effects on water flow and distribution in unsaturated porous media: Analyses of flight experiments. *Water resources research.* 35(4): pp.929-942.
- Karlsson, N. B., L. S. Schmidt, and C. S. Hvidberg. 2015. Volume of Martian midlatitude glaciers from radar observations and ice flow modeling. *Geophysical Research Letters.* 42(8): pp.2627-2633.
- Li, S., P. G. Lucey, R. E. Milliken, P. O. Hayne, E. Fisher, J. P. Williams, D. M. Hurley, and R. C. Elphic. 2018. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions. *P. Natl. A. Sci. USA.* 115(36): pp. 8907-8912.
- Maggi, F., F. H. Tang, C. Pallud, and C. Gu. 2018. A urine-fuelled soil-based bioregenerative life support system for long-term and long-distance manned space missions. *Life sciences in space research*, 17: pp. 1-14.
- Massa, G. D., J. C. Emmerich, R. C. Morrow, C. M. Bourget, and C. A. Mitchell. 2007. Plant-growth lighting for space life support: a review. *Gravitational and Space Research.* 19(2): pp. 19-30.

- Massa GD, N. F. Dufour, J. A. Carver, M. E. Hummerick, R. M. Wheeler, R. C. Morrow and T. M. Smith. 2017. VEG-01: Veggie hardware validation testing on the International space station. *Open Agriculture*. 2: 33-41.
- Nakamura T, Sassa N, Kuroiwa E, Negishi Y, Hashimoto A, Yamashita M and Yamada M. (1999): Growth of *Prunus* tree stems under simulated microgravity conditions. *Advances in Space Research*, 23: 2017-2020. 1999.
- Or D., M. Tuller, and S.B. Jones. 2009. Liquid behavior in partially saturated porous media under variable gravity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73(2): pp. 341-350.
- Orosei, R., S. E. Lauro, E. Pettinelli, A. Cicchetti, M. Coradini, B. Cosciotti, F. D. Paolo, E. Flamini, E. Mattei, M. Pajola, F. Soldovieri, M. Cartacci, F. Cassenti, A. Frigeri, S. Giuppi, R. Martufi, A. Masdea, G. Mitri, C. Nenna, R. Noschese, M. Restano, and R. Seu. 2018. Radar evidence of subglacial liquid water on Mars. *Science*. 361(6401): pp. 490-493.
- Reddi, L. N., M. Xiao, and S.L. Steinberg. 2005. Discontinuous pore fluid distribution under microgravity-KC-135 flight investigations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69(3): pp. 593-598.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*. 1(5): pp. 318-333.
- Yendler, B. S., B. Webbon, I. Podolski, and R. J. Bula. 1996. Capillary movement of liquid in granular beds in microgravity. *Advances in Space Research*. 18(4/5): pp. 233-237.